УДК 621.317.6

ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

А.Г. Лощилов, Э.В. Семенов, Н.Д. Малютин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: yogl@mail.ru

Предложена структурная схема измерительного комплекса, позволяющего производить измерение характеристик четырехполюсников при импульсном воздействии. Приведены математические модели и алгоритмы, лежащие в основе импульсного метода измерения временных и частотных характеристик устройств. Сопоставлены результаты экспериментальных измерений проведенных импульсным и классическим частотным методами. Показаны преимущества импульсного метода измерений на примере измерения характеристик полосно-пропускающего фильтра.

Введение

К настоящему времени в измерительной технике, производимой как в России [1], так и за рубежом [2–4], доминирует направление, основанное на измерении характеристик устройств в частотной области с помощью векторных анализаторов цепей. Принцип действия таких измерителей частотных характеристик основан на воздействии на объект измерения квазигармоническим сигналом с постоянной амплитудой и линейно меняющейся частотой, разделении отраженной и падающей составляющих волн, переносе сигналов на промежуточную частоту (ПЧ) с учетом фазы, оцифровке сигнала на ПЧ и вычислении частотных характеристик измеряемого устройства. Кроме того, существуют так называемые программные опции приборов, которые позволяют осуществить измерения характеристик устройств в частотной области с последующим вычислении отклика во временной [5]. На самом деле вид зондирующего сигнала в таких приборах остается квазигармоническим, изменяется лишь обработка, позволяющая отобразить характеристики во временной области в привычном для пользователя виде. Такая постановка имеет право на существование, однако, только для линейных и стационарных цепей.

Альтернативой частотному методу является временной (времяимпульсный) [6] метод измерения. Данный метод основан на воздействии на исследуемый объект одним или несколькими сверхширокополосными импульсными тестовыми сигналами и анализе откликов объекта на тестовый сигнал (сигналы). Так как спектр тестового сигнала занимает весь исследуемый диапазон, то характеристики объекта во всем диапазоне частот измеряются одновременно. Преимуществом данного метода является также то, что наряду с частотными характеристиками измеряются временные характеристики устройства, которые несут дополнительную информацию о структуре объекта измерения [7]. Форма сигнала может варьироваться в широких пределах, поэтому измеренные характеристики максимально точно отражают реальные характеристики устройства в заданном режиме измерения (работы).

В данной статье описывается экспериментальная установка и метод измерения импульсных и частотных характеристик четырехполюсников во временной области.

Структурная схема измерительной установки и метод измерений

Структурная схема измерительной установки представлена на рис. 1.

На схеме обозначены: персональная ЭВМ (ПЭВМ), генератор сигналов произвольной формы (ГСПФ), двухканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), измерительный тракт (со-

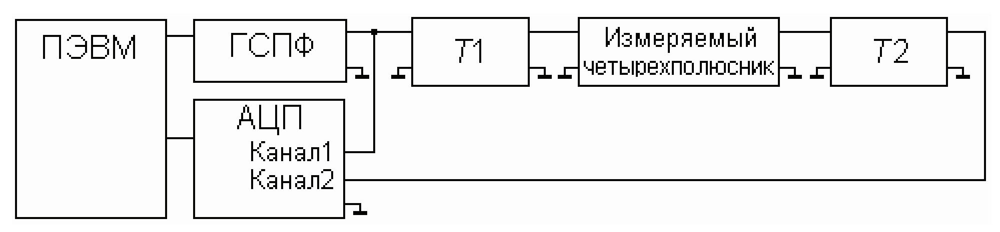


Рис. 1. *Структурная схема измерительной установки*

стоящий из частей *T*1 и *T*2) и измеряемый четырехполюсник, включенный в разрыв измерительного тракта.

Измерительная установка функционирует следующим образом:

- на ПЭВМ синтезируется зондирующий импульс и передается на ГСПФ;
- ГСПФ преобразует цифровую последовательность в аналоговый зондирующий сигнал, который распространяется в измерительном тракте и измеряемом четырехполюснике;
- измерительный тракт обеспечивает разделение падающих и отраженных от четырехполюсника импульсов, а также граничные условия на зажимах измеряемого четырехполюсника;
- АЦП производит съем и оцифровку сигналов на входе и выходе измерительного тракта с последующей передачей данных в ПЭВМ;
- полученные данные обрабатываются в ПЭВМ; в результате обработки строятся импульсные и частотные характеристики измеряемого четырехполюсника.

В процессе каждого измерения на входах каналов АЦП наблюдаются три локализованных во времени сигнала. Обозначим их *u*1, *u*2 и *u*3. Из этих сигналов *u*1 и *u*2 будут наблюдаться на первом измерительном канале, а *u*3 – на втором измерительном канале. Сигнал *u*1 – это зондирующий импульс, полученный с выхода ГСПФ. *u*2 – сигнал, отраженный от объекта измерения, представляет входную реакцию четырехполюсника на зондирующее воздействие. Сигнал *u*3 снимается с выхода объекта измерения и несет информацию об импульсной характеристике объекта измерения на проход.

На рис. 2 приведена иллюстрация возможной комбинации зондирующего широкополосного импульса (видеоимпульса) *u*1 и двух реакций измеряемого устройства *u*2 и *u*3 на импульсное воздействие *u*1.

Для разделения падающих и отраженных волн на входе четырехполюсника при импульсном методе измерения достаточно задержать отраженный от входа четырехполюсника сигнал относительно зондирующего. Для этого в качестве части измерительного тракта *T*1 используется линия задержки. Часть измерительного тракта *T*2 может представлять собой согласующую цепь, имеющую в рабочем диапазоне частот измерительной установки входное сопротивление, равное волновому сопротивлению *T*1. При условии, что время задержки *T*1 больше половины длительности зондирующего импульса или его автокорреляционной функции, становится возможным произвести цифровую обработку данных, измеренных на первом канале АЦП, и осуществить стробирование (выделение) зондирующего и отраженного сигналов.

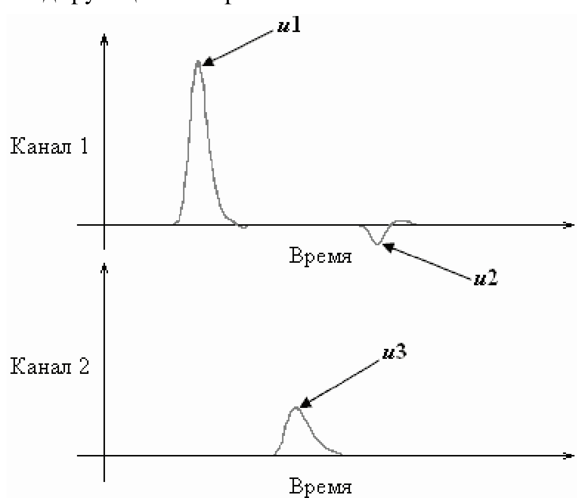


Рис. 2. *Иллюстрация возможного зондирующего сигнала u1 и двух реакций u2 и u3 измеряемого устройства*

Для проведения стробирования используется аппарат оконных («весовых») функций [8]. В процессе стробирования функция, описывающая исходный сигнал, умножается на функцию временного окна. Положение, ширина и тип оконной функции выбираются таким образом, чтобы выделить полезные составляющие сигнала (зондирующий, отраженный, либо прошедший импульс) на фоне паразитных переотражений и шумов. Одним из основных требований к оконной функции является минимум спектральных искажений, вызванных явлением Гиббса.

Математические модели и алгоритмы обработки

Очевидно, что спектральный состав измеренных сигналов *u*1, *u*2 и *u*3 (рис. 2) несет в себе информацию о частотных характеристиках измеряемого четырехполюсника. Обозначим *U*1, *U*2, *U*3 спектры сигналов *u*1, *u*2 и *u*3, соответственно. Для данных спектральных характеристик сигналов были получены соотношения для вычисления комплексных коэффициентов отражения и передачи измеряемого четырехполюсника.

Соотношения для определения комплексного коэффициента отражения от четырехполюсника при прямом направлении передачи

Так как включение первого измерительного канала на вход измерительного тракта (рис. 1) приводит к рассогласованию в точке включения, спектр сигнала, попадающего на первый канал АЦП, является результатом интерференции падающей волны ($U2_{пад}$) и отраженной от точки включения волны ($U2_{отр}$). Используя соотношения [9], получим выражение для падающей на первый канал волны, считая известным коэффициент отражения от точки включения $Г_{T1}$.

$$U2_{пад} = \frac{U2}{1+Г_{T1}}. \quad (1)$$

Запишем в терминах матрицы рассеяния [10] соотношение между спектральной плотностью зондирующего импульса и спектральной плотностью отклика с учетом потерь в измерительном тракте $T1$:

$$U2_{пад} = S12_{T1} \cdot S11 \cdot S21_{T1} \cdot U1, \quad (2)$$

где $S12_{T1}$, $S21_{T1}$ – коэффициенты передачи части $T1$ измерительного тракта в обратном и прямом направлении передачи; $S11$ – коэффициент отражения от четырехполюсника при прямом направлении передачи.

Подставив (1) в (2), после преобразования получим:

$$S11 = \frac{U2}{U1} \cdot [S12_{T1} \cdot S21_{T1} \cdot (1+Г_{T1})]^{-1}. \quad (3)$$

Из формулы (3) можно сделать вывод, что коэффициент отражения $S11$ зависит от соотношения падающих и отраженных от четырехполюсника волн $\frac{U2}{U1}$. Множитель $[S12_{T1} \cdot S21_{T1} \cdot (1+Г_{T1})]^{-1}$ представляет собой калибровочный коэффициент, который не зависит от измеряемого устройства, а зависит только от параметров измерительного тракта.

Соотношения для определения комплексного коэффициента передачи четырехполюсника при прямом направлении передачи

Аналогично (1) найдем величину волны, падающей на второй канал АЦП, при условии, что коэффициент отражения $Г_{T2}$ известен:

$$U3_{пад} = \frac{U3}{1+Г_{T2}}. \quad (4)$$

Запишем соотношение между спектральной плотностью зондирующего импульса и спектральной плотностью сигнала, прошедшего через четырехполюсник, с учетом потерь в измерительном тракте $T1$ и $T2$:

$$U3_{пад} = S21_{T2} \cdot S21 \cdot S21_{T1} \cdot U1, \quad (5)$$

где $S21_{T1}$, $S21_{T2}$ – коэффициенты передачи частей $T1$ и $T2$ измерительного тракта в прямом направлении передачи; $S21$ – коэффициент передачи четырехполюсника при прямом направлении передачи.

Подставив (4) в (5) получим выражение для комплексного коэффициента передачи четырехполюсника:

$$S21 = \frac{U3}{U1} \cdot [S21_{T1} \cdot S21_{T2} \cdot (1+Г_{T2})]^{-1}. \quad (6)$$

Таким образом, имея сведения о характеристиках измерительного тракта, становится возможным по результатам одного импульсного воздействия определить входные и проходные частотные характеристики измеряемого четырехполюсника.

Характеристики измерительного тракта могут быть известны априорно, или учтены в процессе калибровки.

Калибровка на проход

Для учета параметров частей измерительного тракта $T1$ и $T2$ в режиме измерения проходной характеристики требуется произвести калибровку на проход, включив последовательно $T1$ и $T2$ и измерив зондирующий импульс на входе измерительного тракта и импульс, прошедший в канал 2. Схема для проведения калибровки на проход приведена на рис. 3.

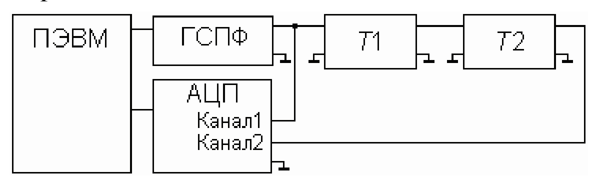


Рис. 3. *Схема включения для проведения калибровки на проход*

Так как части измерительного тракта включены напрямую ($S21=1$), то выражение для калибровочного коэффициента на проход $K_п=[S21_{T1}.S21_{T2}.(1+Г_{T2})]^{-1}$ примет следующий вид:

$$K_п = \frac{U1}{U3}.$$

Калибровка на отражение

Для измерения входной характеристики четырехполюсника требуется произвести калибровку на отражение, создав на втором конце измерительного тракта $T1$ условие для полного отражения сигнала – холостой ход или короткое замыкание.

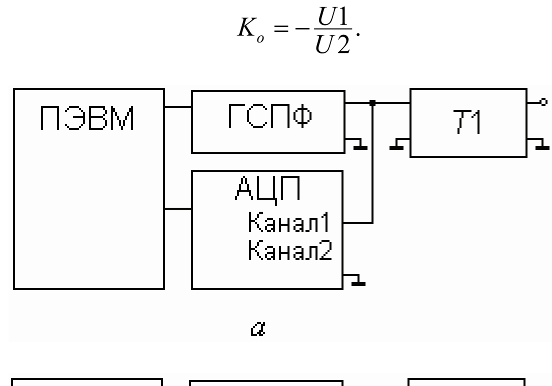
Варианты схем для калибровки на отражение приведены на рис. 4.

Из формулы (3), при условии $S11=1$, определим калибровочный коэффициент на отражение $K_о=[S12_{T1}.S21_{T1}.(1+Г_{T1})]^{-1}$ при измерении в режиме холостого хода на конце измерительного тракта $T1$:

$$K_о = \frac{U1}{U2}. \quad (7)$$

Аналогично определим калибровочный коэффициент в режиме короткого замыкания на конце измерительного тракта $T1$. Так как при условии короткого замыкания $S11=-1$, выражение (7) запишется как:

$$K_o = -\frac{U1}{U2}.$$



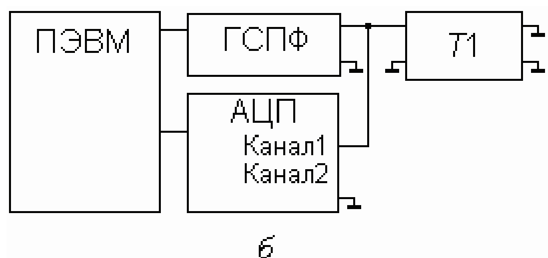


Рис. 4. *Варианты схем для калибровки на отражение: а) режим холостого хода на конце; б) режим короткого замыкания на конце*

Выражения для определения частотных характеристик (3) и (6) примут вид:

$$S11 = \frac{U2}{U1} K_o,$$

$$S21 = \frac{U3}{U1} K_n.$$

Экспериментальные результаты

Было проведено экспериментальное измерение характеристик полосно-пропускающего фильтра. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 5.

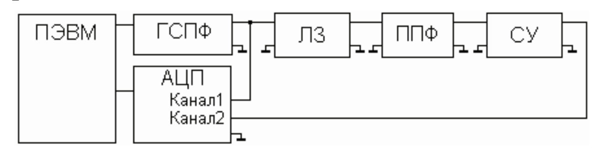


Рис. 5. *Схема экспериментального стенда*

На схеме обозначены:

- ГСПФ – генератор сигналов произвольной формы частотой дискретизации до 400 МГц, амплитуда выходного сигнала 1 В;
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь с частотой дискретизации до 1 ГГц, вертикальным разрешением 8 бит и гарантированной полосой входного сигнала 100 МГц (осциллограф Tektronix TDS 1012);
- ЛЗ – линия задержки, задержка 100 нс, волновое сопротивление 50 Ом, затухание – 5 дБ на частоте 100 МГц;
- СУ – согласующее устройство $Z_{вх}$=50 Ом, частота среза 120 МГц;
- ППФ – полосно-пропускающий фильтр, рис. 6 (L1=L3=1,5 мкГн, L2=15 нГн, C1=C3=3,3 пФ, C2=330 пФ).

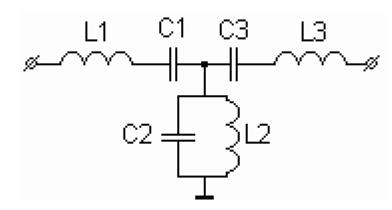
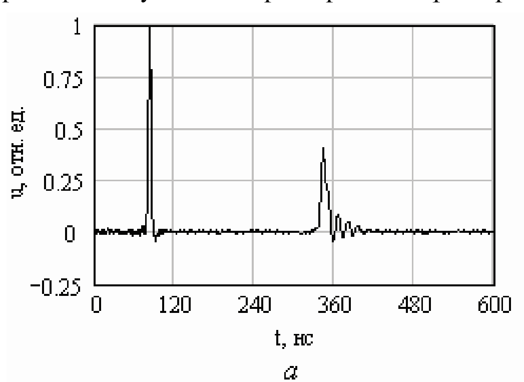


Рис. 6. *Схема электрическая фильтра*

На рис. 7 приведены экспериментально измеренные импульсные характеристики фильтра.



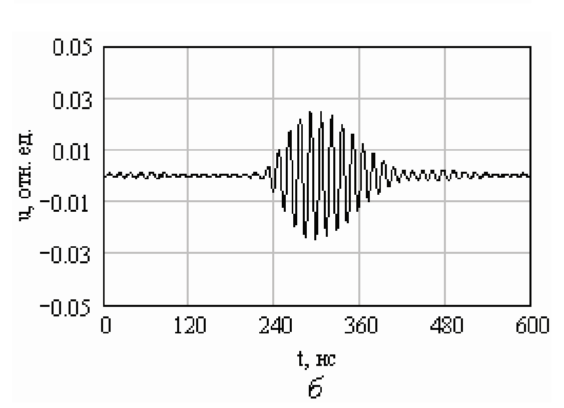


Рис. 7. *Импульсные характеристики фильтра: а) входная, б) проходная*

По измеренным импульсным характеристикам были рассчитаны входные и проходные частотные характеристики фильтра. Частотные характеристики фильтра также были измерены на скалярном анализаторе цепей Р2М (производство ООО НПФ «Микран»). На рис. 8 приведено сопоставление результатов измерений.

Заключение

Предложена структурная схема измерительного комплекса, позволяющего производить измерение характеристик четырехполюсников при импульсном воздействии. Приведены математические модели и алгоритмы, лежащие в основе импульсного метода измерения временных и частотных характеристик устройств.

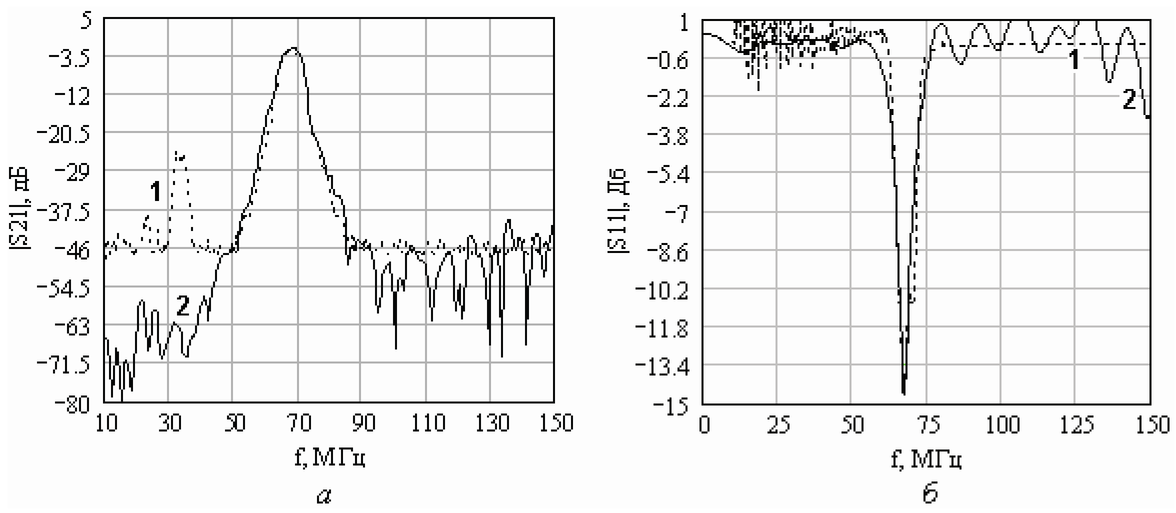


Рис. 8. *Частотные характеристики фильтра: а) входная, б) проходная, 1 – частотный метод измерения (прибор Р2М), 2 – импульсный метод*

Результаты измерений частотных характеристик полосно-пропускающего фильтра с помощью цифрового измерительного комплекса показывают достаточно хорошее совпадение с результатами, полученными с помощью скалярного анализатора цепей Р2М. Комплекс позволяет производить измерение частотных характеристик четырехполюсников в диапазоне частот от 0 Гц до 150 МГц. Динамический диапазон цифрового измерительного комплекса не менее 48 дБ, на частотах ниже 50 МГц динамический диапазон достигает 60 дБ.

Основными преимуществами предложенного измерительного комплекса являются: расширенный динамический диапазон, возможность измерения частотных характеристик четырехполюсников от нулевой частоты, возможность одновременного измерения временных и частотных характеристик устройств.

Работа выполнена при поддержке Администрации Томской области (государственный контракт № 102 от 20.09.2005) и федерального агентства по науке и инновациям (государственный контракт № 02.438.11.7046 от 20.06.2006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по эксплуатации РЭ1_Р2М-04 (часть 1) [Электронный ресурс] / Научно-производственная фирма Микран – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. 2006. – Режим доступа: http://www.micran.ru/~ulw/p2m/Docs/OperationManualP2M04.pdf, свободный.
2. The User and Programming manual for all PNA models [Электронный ресурс] / Agilent Technologies – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. 2000–2006. – Режим доступа: http://na.tm.agilent.com/pna/help/pnahelp.chm, свободный.
3. Datasheet – MS4622A/B/C/D, MS4623A/B/C/D, MS4624A/B/C/D Vector Network Measurement Systems [Электронный ресурс] / Anritsu Company – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. 2006. – Режим доступа: http://www.eu.anritsu.com/files/11410-00289.pdf
4. Operating Manual R&S ZVA, R&S ZVB, R&S ZVT – FW 2.00 [Электронный ресурс] / ROHDE&SCHWARZ – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. 2006. – Режим доступа: http://www.rohde-schwarz.com/www/downcent.nsf/file/ZVA_ZVB_ZVT_Manual_08_V2-00.pdf/$file/ZVA_ZVB_ZVT_Manual_08_V2-00
5. Hines M.E., Stinehefler H.E. Time-Domain Oscillographic Microwave Network Analysis Using Frequency-Domain Data // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1974. – V. MTT-22. – № 3. – P. 276–282.
6. Глебович Г.В., Андриянов А.В., Введенский Ю.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
7. Banerjee K., Mehrotra A. Analysis of On-Chip Inductance Effects for Distributed RLC Interconnects // IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. – 2002. – V. 21. – № 8. – P. 904–915.
8. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 855 с.
9. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
10. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырёхполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. – М.: Наука, 1974. – 128 с.